



Wybór metody wzmocnienia słupów murowanych w obiektach zabytkowych z wykorzystaniem syntetycznego wskaźnika oceny

Katarzyna Kafel¹, Agnieszka Leśniak²

STRESZCZENIE:

Istnieje wiele czynników niszczących konstrukcje budowlane, na które szczególnie narażone są obiekty powstałe wiele lat temu. Istotnym problemem w przypadku takich obiektów jest sposób i koszt wzmocnienia ich poszczególnych elementów. Pojęcie „wzmocnienia” elementów budynku związane jest z konserwacją, czyli procesem, który ma na celu utrzymanie obiektu budowlanego w większej niż do tej pory trwałości. Celem artykułu jest wybór metody wzmocnienia słupów murowanych stanowiących elementy konstrukcyjne obiektów zabytkowych. Autorzy przyjęli cztery kryteria oceny i wykorzystali syntetyczny wskaźnik oceny umożliwiający wybór najkorzystniejszego rozwiązania.

SŁOWA KLUCZOWE:

analiza wielokryterialna; zabytek; wzmocnienie; konserwacja

1. Wprowadzenie

Potrzeba zachowania dziedzictwa kulturowego spowodowała konieczność rozwoju dziedziny konserwacji zabytków, w tym również poszukiwanie i ulepszanie sposobów na wzmacnianie obiektu zabytkowego czy jego poszczególnych elementów. Tematykę wzmocnień wybranych elementów konstrukcji poruszono m.in. w publikacji [1], rozważając sposób wzmocnienia istniejących prefabrykowanych łączników belkowo–słupowych. Wzmocnienia szkieletów żelbetonowych przy użyciu podpór stalowych prezentowali autorzy pracy [2]. Dobór sztywności i wytrzymałości ram ocenili poprzez zamodelowanie i weryfikację obliczeń. Istnieją różne metody umocnień elementów konstrukcyjnych obiektów zabytkowych, które wymagają odpowiedniej selekcji, a w dalszym etapie uargumentowanego wyboru. Dokładna analiza przypadku w początkowym etapie planowania inwestycji może mieć korzystny wpływ na cały proces, szczególnie pod względem finansowym [3]. W tym celu przydatne mogą być metody analizy wielokryterialnej. Mają one szereg zalet [4]: umożliwiają przyjęcie do oceny dużej liczby kryteriów; jednoznacznie szeregują wybór wariantu najlepszego, obiektywizują oceny ekspertów; ich algorytmy obliczeniowe nie są trudne do implementacji komputerowej. Narzędzi wielokryterialnego wspomagania procesu podejmowania decyzji jest wiele, a możliwości ich szerokiego zastosowania w budownictwie zaprezentowano m.in. w pracach [5–9].

Celem artykułu jest wybór metody wzmocnienia słupów murowanych stanowiących elementy konstrukcyjne obiektów zabytkowych z wykorzystaniem metody analizy wielokryterialnej. Zaproponowano dwa warianty wykonania wzmocnienia: obejmę z zaprawy zbrojonej oraz obejmę stalową.

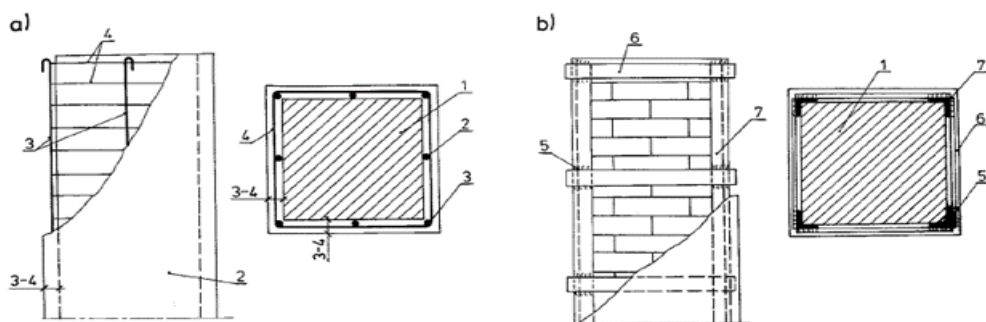
¹ Politechnika Krakowska im. Tadeusza Kościuszki, ul. Warszawska 24, 31–155 Kraków, e-mail: kkafel@L3.pk.edu.pl, orcid id: 0000-0002-4656-6507

² Politechnika Krakowska im. Tadeusza Kościuszki, ul. Warszawska 24, 31–155 Kraków, e-mail: alesniak@L3.pk.edu.pl, orcid id: 0000-0002-4811-5574

2. Charakterystyka wariantów wzmocnień słupów murowanych w obiektach zabytkowych

Istnieje wiele czynników niszczących konstrukcje budowlane, na które szczególnie narażone są obiekty powstałe wiele lat temu. Elementy konstrukcyjne, na które mechanizmy destrukcyjne miały znaczny wpływ, powodujący ich zniszczenie oraz brak zdolności do samodzielnego, dalszego przeniesienia silnych obciążeń, należałoby całkowicie usunąć i zastąpić nowymi. Ze względu na konserwatorskich w szczególnych przypadkach może okazać się to problematyczne bądź całkowicie niemożliwe. Zaprojektowanie oraz zainstalowanie pomocniczej konstrukcji do wzmocnienia wadliwego elementu w takiej sytuacji staje się szansą dla obiektu zabytkowego na kolejne lata.

Obejma jest jedną z częściej stosowanych metod umocnień słupów murowanych w przypadku obiektów zabytkowych [10]. Ze względu na rodzaj materiału, z którego jest wykonana, rozróżnia się: obejmę z zaprawy zbrojonej strzemionami oraz obejmę stalową wykonaną z płaskowników (rys. 1) [10].



Rys. 1. Obejmy stosowane do wzmocniania słupów murowanych: a) obejma z zaprawy zbrojonej; b) obejma stalowa [10]: 1 - wzmocniany słupek; 2 - zaprawa cementowa; 3 - zbrojenie; 4 - zbrojenie; 5 - spoina; 6 - płaskownik stalowy; 7 - kątownik

Autorzy założyli do celów obliczeniowych parametry dwóch słupów murowanych różnych budynków zabytkowych. Pierwszy wykonany jest z cegły klasy 10, a drugi - z bloczków betonowych klasy 8. Pozostałe parametry dla obydwóch przypadków są następujące: wysokość: 3 metry oraz kwadratowe przekroje o długości boku 70 centymetrów. Autorzy przyjęli, że na oba słupy działa siła osiowa N o wartości równej 900 kN. Indywidualne parametry wariantów wzmocnień przedstawiono w tabeli 1.

Tabela 1

Charakterystyka zastosowanych wzmocnień

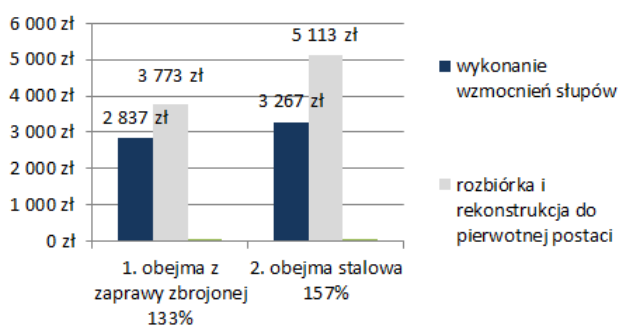
Rodzaj wzmocnienia	Parametry przyjęte przez autorów
Obejma z zaprawy zbrojonej	W projektowanym wzmocnieniu słupa z cegły klasy 10 zastosowano: strzemiona klasy A-I o średnicy 6 milimetrów, zaprawę marki o wytrzymałości na ściskanie 7,5-10 MPa o grubości 3 centymetrów.
Obejma stalowa	Zaprojektowane wzmocnienie słupa z bloczków betonowych klasy 8 wykorzystuje pionowe kątowniki (50 x 50 x 5 milimetrów) oraz płaskowniki (50 x 5 milimetrów) umiejscowione co 50 centymetrów. Zastosowano siatkę podtynkową, a następnie nałożono zaprawę cementową o grubości 3 centymetrów.

3. Wielokryterialna analiza porównawcza

Wybór najbardziej korzystnego rozwiązania wzmocnienia słupów murowanych jest celem przeprowadzonej analizy. Metody wielokryterialnej analizy porównawczej wyodrębniają grupę

algorytmów budujących skalar, którego wartość liczbową stanowi syntetyczny wskaźnik oceny [9]. Spośród istniejących formuł ocen syntetycznych, opisanych m.in. w [9], autorzy wybrali i zastosowali w pracy: wskaźnik multiplikacyjny, wskaźnik multiplikacyjny skorygowany, średnią harmoniczną ważoną, średnią geometryczną ważoną.

Zaproponowano cztery kryteria oceny wariantów. Pierwsze kryterium stanowi stosunek kosztów rozbiórki i rekonstrukcji do kosztów wzmocnienia słupów, wyrażony w procentach (rys. 2). Autorzy dokonali kalkulacji kosztów wykonania obejm wraz z zabezpieczeniem terenu objętego pracami budowlanymi oraz zabezpieczenia konstrukcji stropu w trakcie robót budowlanych. Oszacowano również koszty ewentualnej rozbiórki i rekonstrukcji do pierwotnej postaci słupów, a następnie porównano daną wartość z kosztami wzmocnienia słupów obejmą z zaprawy zbrojonej oraz obejmą stalową. Wartości kosztów oraz procentowy stosunek kosztów rozbiórki i rekonstrukcji do kosztów wzmocnienia słupów przedstawiono na rysunku 2. Pominięto bezpośredni wpływ kryterium kosztu wykonania poszczególnych wzmocnień, jednak wartości wyznaczonych kosztów wykorzystano do określenia pierwszego kryterium „stosunek kosztów rozbiórki i rekonstrukcji do kosztów wzmocnienia słupów”.



Rys. 2. Zestawienie kosztów wykonania wzmocnień oraz rozbiórki i rekonstrukcji słupów murowanych

Kolejne przyjęte kryterium to wpływ na estetykę wizualną, czyli ingerencja w formę i kształt. Autorzy podjęli próbę zobjektywizowanej oceny różnicy w wyglądzie po zaprojektowanym wzmocnieniu w stosunku do pierwotnego. Trzecie kryterium „sposób montażu” uwzględnia następujące cechy: pracochłonność, poziom skomplikowania robót, wymagane kwalifikacje i umiejętności wykonujących prace budowlane. Ostatnim kryterium jest „trwałość” zaprojektowanej konstrukcji wzmacniającej. Uwzględniono w nim odporność na czynniki destrukcyjne mające wpływ na pogorszenie własności zastosowanego rozwiązania wzmocnienia (rodzaju obejm). W tabeli 2 zawarto procentowe przedziały możliwych ocen dla trzech kryteriów (z wyjątkiem pierwszego).

Tabela 2

Przedział ocen rozpatrywanych kryteriów wyrażony w procentach

Lp.	Przedział ocen rozpatrywanych kryteriów [%]	Kryterium		
		Wpływ na estetykę wizualną	Sposób montażu	Trwałość wzmocnienia
1	(0%,25%)	Znaczna różnica od pierwotnego	Bardzo skomplikowany, pracochłonny	Mało trwałe
2	(26%, 50%)	Przeciętna różnica od pierwotnego	Umiarkowana trudność	Średnio trwałe
3	(51%,75%)	Niewielka różnica od pierwotnego	Łatwy	Trwałe, odporny na czynniki destrukcyjne
4	(76%,100%)	Nie ma wpływu na wygląd zewnętrzny	Bardzo łatwy	Wyjątkowo odporne na czynniki destrukcyjne

Do wyznaczenia wagi ważności każdego kryterium zastosowano metodę analizy par opisaną szczegółowo w [9]. Ostatecznie przyjęto dla: kryterium pierwszego – stosunek kosztów rozbiórki i rekonstrukcji do kosztów wzmocnienia słupów – waga: 0,1; dla kryterium drugiego – wpływ na estetykę wizualną – waga: 0,4; dla kryterium trzeciego – sposób montażu – waga: 0,2; dla czwartego – trwałość wzmocnienia – waga: 0,3.

Aby wykorzystać syntetyczne wskaźniki oceny, dokonano podziału kryteriów na stymulanty – pozostające w dodatniej korelacji ze zmienną objaśnianą – oraz destymulanty – o korelacji ujemnej. Stymulanta jest zaletą, czyli jej wyższa wartość determinuje korzystniejszą ocenę rozpatrywanego rozwiązania. Destymulanta jest wadą, wyższa wartość pogarsza ocenę wariantu [9]. Wartości ocen przyjętych czterech kryteriów oraz ich podział na stymulanty i destymulanty przedstawiono w tabeli 3.

Tabela 3

Wartości ocen przyjętych kryteriów oraz ich podział na stymulanty i destymulanty

Kryterium	Rodzaj	Wartości kryteriów dla wzmocnienia obejmą z zaprawy zbrojonej	Wartości kryteriów dla wzmocnienia obejmą stalową
1. Stosunek kosztów rozbiórki i rekonstrukcji do kosztów wzmocnienia słupów [%]	Destymulanta	133%	157%
2. Wpływ na estetykę wizualną [%]	Stymulanta	50%	26%
3. Sposób montażu [%]	Stymulanta	50%	40%
4. Trwałość [%]	Stymulanta	45%	70%

W kolejnym etapie oceny przyjętym wartościom kryteriów należy nadać wartości niemianowane. Umożliwia to porównanie cech, nie tylko ilościowych, ale również jakościowych. Autorzy zastosowali jedną metodę kodowania: kodowanie wg Neumana–Morgensterna, jedną z częściej stosowanych w zagadnieniach z obszaru podejmowania decyzji w budownictwie [4, 7, 8]. Jej szczegółowy opis można odnaleźć w pracy [9]. Analiza formuł ocen syntetycznych wymaga, aby wartości kodowane były dodatnie, ze względu na rodzaj zastosowanych wskaźników, średnią harmoniczną ważoną oraz średnią geometryczną ważoną. Podając za [9], wykorzystane oceny syntetyczne wymagają wprowadzenia sztucznie wartości najmniejszej z danego przedziału. Autorzy wprowadzili do obliczeń wartość 0,001 zastępującą wartość 0. W przeciwnym wypadku występujące 0 dla mniej korzystnej opcji zaburzyłoby wyniki ocen wskaźników oraz średnich. Zestawienie zakodowanych wartości kryteriów zakodowanych metodą wg Neumana–Morgensterna po uwzględnieniu przyjętych wag prezentuje tabela 4.

Tabela 4

Wartości kryteriów zakodowanych kryteriów z uwzględnieniem wag

Wariant	Kryterium			
	Opłacalność rozbiórki i całkowitej rekonstrukcji waga: 0,100	Wpływ na estetykę wizualną waga: 0,400	Sposób montażu waga: 0,200	Trwałość wzmocnienia waga: 0,300
Wariant 1. Obejma z zaprawy zbrojonej	0,100	0,400	0,200	0,001
Wariant 2. Obejma stalowa	0,001	0,001	0,001	0,300

Ostatnim etapem przeprowadzonej analizy jest wyznaczenie wskaźnika multiplikacyjnego (wzór (1)), wskaźnika multiplikacyjnego skorygowanego (wzór (2)), średniej harmonicznego ważonej (wzór (3)) oraz średniej geometrycznej ważonej (wzór (4)) [9]:

$$J_i = \prod_{j=1}^m z_{ij} \quad (1)$$

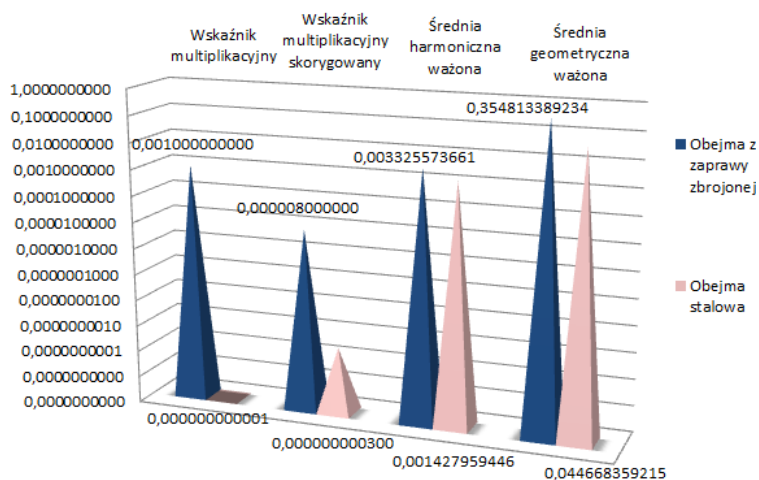
$$J_i = \prod_{j=1}^m z_{ij} * v_{ij} \quad (2)$$

$$J_i = \frac{\sum_{j=1}^m (v_j)}{\sum_{j=1}^m \frac{v_j}{z_{ij}}} \quad (3)$$

$$J_i = \sum v_{ij} \sqrt[m]{\prod_{j=1}^m (z_{ij})^{v_j}} \quad (4)$$

gdzie: $z_{ij} > 0$, J_i – ocena syntetyczna i -tego wariantu, m – liczba kryteriów, z_{ij} – zakodowana miara i -tego wariantu względem j -tego kryterium, v_j – waga j -tego kryterium.

Zastawienie wartości wybranych obliczonych wskaźników syntetycznych zaprezentowano na rysunku 3.



Rys. 3. Zestawienie wartości wskaźników syntetycznych dla kodowania metodą wg Neumana–Morgensterna

Uzyskane wartości wskaźników oceny syntetycznej (rys. 3) świadczą jednoznacznie o tym, że wzmocnienie obejmą z zaprawy zbrojonej jest korzystniejszym rozwiązaniem.

4. Wnioski

Metoda wzmocnienia elementów konstrukcyjnych obiektów zabytkowych uzależniona jest przede wszystkim od materiału, z jakiego został wykonany. Analiza wielokryterialna zastosowana w pracy skutecznie pozwoliła ocenić warianty wzmocnienia słupów murowanych. Zdefiniowano hierarchię ważności wag rozpatrywanych kryteriów poprzez porównanie parami przyjętych kryteriów oceny. Najbardziej znaczącym kryterium okazał się być „wpływ na estetykę wizualną”. Ze względu na zabytkowy charakter elementów konstrukcyjnych, jakimi są słupy i stawiane w związku z tym, nierzadko bardzo restrykcyjne, wymagania konserwatorskie, kwestie architektoniczne stają się cechą fundamentalną. Autorzy pracy założyli, że perspektywa

zachowania ustroju konstrukcji w formie najmniej różniącej się od oryginału jest główną koncepcją analizy, którą należy możliwie zmaksymalizować. Poprzez uzyskane większe wartości wskaźników oceny syntetycznej można wykazać, że korzystniejszym rozwiązaniem jest wzmocnienie z zaprawy zbrojonej. Warto także podkreślić, że korzystniejszy wariant wzmocnienia słupa jest jednocześnie wariantem tańszym, pomimo tego, iż kalkulacja kosztów wykonania obejm nie była bezpośrednio rozpatrywanym kryterium. Jest ono jednak najczęściej stosowanym miernikiem opłacalności przez wykonawców i inwestorów.

Literatura

- [1] Khalili A., Kheyroddin A., Sharbatdar M.M., Farahani A., Study on the nonlinear behavior of strengthened RC frames using steel prop and crub in connections and strengthening of beam and column, *Journal of Modeling in Engineering* 2016, 14/46, 25–38.
- [2] Yousef A. Al-Salloum, Mohammed A. Alrubaidi, Hussein M. Elsanadedy, Tarek H. Almusallam, Rizwan A. Iqbal., Strengthening of precast RC beam–column connections for progressive collapse mitigation using bolted steel plates, *Engineering Structures* 2018, 161, 146–160.
- [3] Książek M., Analiza porównawcza wybranych metod wielokryterialnych oceny przedsięwzięć inwestycyjnych, *Budownictwo i Inżynieria Środowiska* 2011, 2, 555–561.
- [4] Lendo-Siwicka M., Połoński M., Pawluk K., Identification of the interference in the investment process during the realization of a shopping centre – a case study, *Archives of Civil Engineering* 2016, LXII, 1, 159–172.
- [5] Dytczak M., Wybrane metody rozwiązywania wielokryterialnych problemów decyzyjnych w budownictwie, *Oficyna Wydawnicza Politechniki Opolskiej, Opole* 2010.
- [6] Krzemiński M., Książek M., Wielokryterialna analiza wybranych obiektów budowlanych wraz z analizą kryteriów oceny przy zastosowaniu metody entropii, *PZITB, Puławy* 2009, 249–254.
- [7] Leśniak A., Radziejowska A., Supporting bidding decision using multi-criteria analysis methods, *Procedia Engineering* 2017, 208, 76–81.
- [8] Sobotka A., Pająk M., Metody wzmocnienia posadowienia zabytkowego budynku i ich ocena za pomocą analizy wielokryterialnej, *Górnictwo i Geoinżynieria* 2008, 32.2, 277–286.
- [9] Szwabowski J., Deszcz J., Metody wielokryterialnej analizy porównawczej, *Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice* 2001.
- [10] Masłowski E., Spizewska D., Wzmacnianie konstrukcji budowlanych, *Arkady, Warszawa* 2000.

The choice of brick columns reinforcement method in historic buildings with the use of synthetic measure values

ABSTRACT:

There are many factors leading to the destruction of building structures, the most vulnerable of which being those built many years ago. Costs and methods of reinforcing their individual components are, among others, an important issue. The term "reinforcement" is indirectly related to conservation, that is a process aimed at maintaining the object in a greater than ever durability. The aim of the paper is to choose the method of reinforcing brick pillars constituting structural elements of historical buildings using the multi-criteria analysis method by synthetic measure values. The authors chose four criteria for the evaluation of variants, allowing to unambiguously choose the best option.

KEYWORDS:

multi-criteria analysis; historic building; reinforcement; maintenance